

Emisión de N₂O en cultivos hortícolas y estrategias de mitigación

M. Romero-Gómez^{1,*}, E. M. Suárez-Rey¹

(1) Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), Camino de Purchil s/n, 18004, Granada, España.

* Autor de correspondencia: M. Romero-Gómez [mercedes.romero.gamez@juntadeandalucia.es]

> Recibido el 22 de septiembre de 2016 - Aceptado el 13 de febrero de 2017

Romero-Gómez, M., Suárez-Rey, E.M. 2017. Emisión de N₂O en cultivos hortícolas y estrategias de mitigación. *Ecosistemas* 26(1): 79-85. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-1.10

La sostenibilidad ambiental de los sistemas de producción agrícola es un tema relevante y muy demandado por la sociedad. El uso excesivo y/o inadecuado de fertilizantes, especialmente nitrogenados, provoca un alto impacto medioambiental. La metodología seleccionada para este estudio fue el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Los sistemas de cultivo estudiados fueron: invernadero de plástico (INV), acolchado plástico combinado con agrotexil (AC+AG), acolchado plástico (AC) y cultivo convencional al aire libre (AL). Para cada sistema se evaluó el efecto de diferentes dosis de nitrógeno: 0%, 25%, 50%, 100%, 125% y 150%. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes dosis de fertilización nitrogenada en diferentes sistemas de producción del cultivo de lechuga y de escarola existentes en el área mediterránea sobre las emisiones de N₂O a la atmósfera. El Análisis de Ciclo de Vida ha demostrado ser una metodología útil para evaluar las emisiones de N₂O que producen diferentes sistemas de producción de los cultivos de lechuga y escarola con diferentes dosis de nitrógeno. Las emisiones de N₂O fueron más altas en el sistema de cultivo bajo invernadero. Las mayores emisiones de N₂O en todos los sistemas de cultivo tanto en lechuga como en escarola se producen durante el proceso de fertilización. Desde un punto de vista ambiental, se deberá considerar una reducción y optimización de las dosis de fertilizantes nitrogenados. Para los cultivos de lechuga y escarola, el sistema AC+AG sería la mejor opción teniendo en cuenta la combinación de criterios ambientales y comerciales, con una dosis de N del 50%.

Palabras clave: análisis de ciclo de vida; escarola; impacto ambiental; lechuga; sistemas de cultivo

Romero-Gómez, M., Suárez-Rey, E.M. 2017. N₂O emission in horticultural crops and mitigation strategies. *Ecosistemas* 26(1): 79-85. Doi.: 10.7818/ECOS.2017.26-1.10

Sustainable food production and consumption and the environmental impacts caused by agricultural activities are currently one of the main concerns of consumers and governments. The excessive and/or inadequate use of fertilizers, especially nitrogen fertilizers, produce high environmental burdens. The methodology selected for the environmental study was Life Cycle Assessment (LCA). The cropping systems were: greenhouse (INV), plastic mulch combined with fleece (AC+AG), plastic mulch (AC) and open field (AL). The effects of different nitrogen fertilizer application rates (0%, 25%, 50%, 100%, 125% and 150%) were evaluated for each system. The aim of this analysis was to identify and study the N₂O emissions to air of producing lettuce and escarole in Mediterranean conditions under different production systems and at different nitrogen management application levels. The LCA methodology proved to be a useful tool to evaluate the N₂O emissions of producing two leafy crops with different nitrogen doses. INV was the production system with the highest environmental impact in both crops. Fertilizers produced the largest N₂O emissions in lettuce and escarole production. The reduction and optimizing of N fertilizer application should be considered to improve the N₂O emissions to air of leafy crops in different cultivation systems. For the lettuce and escarole crops, the LCA study indicated that the AC+AG system with 50%N, proved to be the best option considering combined environmental and commercial criteria.

Key words: cropping systems; environmental impact; escarole; lettuce; life cycle assessment

Introducción

El nitrógeno (N) es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas y con frecuencia es el nutriente más limitante en la mayoría de los suelos agrícolas. La aplicación excesiva de fertilizantes nitrogenados es una práctica común para asegurar la disponibilidad de N, pero no es sostenible desde el punto de vista medioambiental. El uso excesivo y/o inadecuado de fertilizantes nitrogenados en cultivos hortícolas de hoja produce una alta contaminación de suelo, aire y agua. Por tanto, se ha de encontrar el equilibrio entre la aplicación de N a los cultivos y la conservación del medioambiente (Suárez-Rey y Romero-Gómez 2014). Los impactos medioambientales del uso del N en agricultura han sido analizados en numerosas investigaciones (ECETOC 1994; Kroeze 1994; Bouwman 1995; Bussink 1996; Kaiser et al. 1996; Sutton et al. 2013;

entre otros). Se han llevado a cabo estudios de asimilación de N y uso de diferentes técnicas agrícolas en cultivos hortícolas con el fin de reducir el impacto ambiental producido por la fertilización nitrogenada (Vázquez et al. 2006; Suárez-Rey et al. 2008; Suárez-Rey et al. 2009). El efecto del uso de diferentes dosis de N en cultivos hortícolas como la lechuga, también ha sido estudiado (Acar et al. 2008; Rickie et al. 2008). La lechuga y escarola son cultivos hortícolas cultivados durante todo el año en diferentes sistemas de cultivo (Maroto et al. 2000; Sábada et al. 2010). La lechuga es uno de los cultivos hortícolas de hoja más importantes a nivel mundial y España es uno de los principales productores (FAOSTAT 2015; MARM 2015).

Para evaluar la sostenibilidad de un sistema de producción agrícola es necesario tener indicadores adecuados. Un aspecto medioambiental específico asociado con la agricultura y que, por tanto,

podría ser un buen indicador de sostenibilidad, son las emisiones de óxido nitroso (N_2O). El N_2O es un poderoso gas de efecto invernadero (Forster et al. 2007) por lo que las emisiones de este gas son parcialmente responsables junto con el dióxido de carbono, el metano y algunos aerosoles, de provocar el calentamiento global. Las emisiones de N_2O en agricultura representan el 60% del total de emisiones de N_2O (Aguilera et al. 2013). La aplicación de fertilizantes nitrogenados al suelo, ya sean orgánicos o sintéticos, producen emisiones de N_2O , ya que este gas es un subproducto de la transformación de los compuestos nitrogenados añadidos al suelo. Las emisiones de N_2O desde el suelo se deben principalmente a la actividad microbiana, a través de procesos de nitrificación y desnitrificación (Firestone y Davidson 1989; Freney 1997). Se han realizado estudios sobre emisiones de N_2O asociados a la agricultura y estrategias de mitigación (Pang et al. 2009; Min et al. 2011; Aguilera et al. 2013) siendo más frecuentes en cultivos hortícolas al aire libre que bajo invernadero de plástico. Cayuela et al. (2016) demostraron que las emisiones reales de N_2O asociadas a la agricultura en el área Mediterránea eran inferiores a los valores esperados.

La agricultura además de ser competitiva para producir alimentos de alta calidad, debe ser sostenible (Commission of the European Communities 1999; UN-DSD 2000). Por ello, se requiere un mayor conocimiento sobre los impactos ambientales de las actividades agrícolas habituales (Mourad et al. 2007). Es necesario realizar un análisis objetivo y evaluar los respectivos procesos productivos e impactos ambientales que éstos ocasionan a lo largo de su ciclo de vida. El análisis del ciclo de vida (ACV), permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad y diagnosticar su sostenibilidad ambiental. Además, permite evaluar y llevar a la práctica estrategias de mitigación. Tras la adaptación de la metodología para su aplicación en agricultura, diversos estudios lo han utilizado para comparar diferentes sistemas de producción de cultivos hortícolas protegidos bajo invernadero (Antón et al. 2005; Torrellas et al. 2012) y al aire libre (Nuñez et al. 2008; Martínez-Blanco et al. 2011; Romero-Gómez et al. 2012).

Con el fin de tener una mayor representación de los sistemas de cultivos hortícolas, se seleccionaron cuatro sistemas de prácticas agrícolas (invernadero de plástico, acolchado plástico combinado con agrotexil, acolchado plástico y cultivo convencional al aire libre) de los cultivos de lechuga y escarola con seis aplicaciones distintas de N. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes dosis de fertilización nitrogenada en diferentes sistemas de producción del cultivo de lechuga y de escarola existentes en el área mediterránea, sobre las emisiones de N_2O a la atmósfera. Este estudio es especialmente relevante para establecer medidas prácticas que lleven a una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, ya que los cultivos hortícolas son los que presentan una mayor tasa de emisión de N_2O (Xiong et al. 2006).

Material y métodos

La metodología empleada para el cálculo de las emisiones de N_2O al aire, derivadas de los diferentes sistemas cultivo de lechuga y escarola fue el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El ACV es un proceso objetivo que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto o cultivo agrícola, identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno, para determinar el impacto que ese uso de recursos y esos vertidos producen al medio ambiente. Además, permite evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental, así como brindar soporte para la toma de decisiones más rentables, sostenibles y eficientes. Para ello se utilizó el modelo "Cranfield Arable and Horticultural Life Cycle Inventory" (Williams et al. 2006). Este inventario consiste en cuantificar los consumos de materias primas y energía junto con todos los residuos sólidos, emisiones a la atmósfera y vertidos al agua derivados de cada uno de los cuatro sistemas de producción de los cultivos estudiados.

El ACV requiere de una base objetiva para la comparación, la unidad funcional (UF), que es definida como la principal función del sistema a analizar (ISO 14040, 2006). Se trata de una medida del comportamiento de los elementos funcionales de un sistema y su propósito es proporcionar una referencia para cuantificar las entradas y salidas del mismo. Esta referencia es necesaria para asegurar que la comparación de los sistemas se hace sobre una base común. En el caso de los sistemas agrícolas la principal función es la producción de alimentos (Audsley et al. 1997), por tanto, se ha considerado como UF, la producción comercial de lechuga y escarola (1 tonelada de peso fresco comercial).

Los cultivos hortícolas de hoja estudiados fueron la lechuga (*Lactuca sativa* L. "Caipira") y la escarola (*Cichorium endivia* L. "Mesbella"). Se han estudiado cuatro sistemas de cultivo representativos de la producción de lechuga y escarola en el área mediterránea: invernadero de plástico (INV), acolchado plástico combinado con agrotexil (AC+AG), acolchado plástico (AC) y cultivo convencional al aire libre (AL). Los datos de los sistemas AC+AG, AC y AL fueron recogidos directamente de las prácticas agrícolas realizadas en las explotaciones experimentales de referencia. Para los datos de producción comercial en invernadero de plástico se consideraron estudios estadísticos de invernaderos comerciales. Los datos de las características y manejo del invernadero fueron obtenidos de Torrellas et al. (2012). Los datos locales relativos a las prácticas agrícolas realizadas en los sistemas AC, AC+AG y AL, se obtuvieron en parcelas experimentales situadas en el IFAPA Centro Camino de Purchil, localizado en la Vega de Granada (Latitud: 37° 10' 21"N; Longitud: 3° 38' 10"; Altitud: 600 m). El riego en todos los cultivos fue por goteo automatizado con emisores en línea. El abonado del cultivo se realizó por fertirrigación, considerando el aporte natural del agua de riego, y el N_{min} presente en el suelo (0-60 cm) al inicio del cultivo. El N mineral en suelo se determinó al inicio, mitad y final del ciclo sobre un extracto 1:2 (Sonneveld 1990), a tres profundidades: 0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm. En el primer intervalo se midió la cantidad de nitrógeno presente en forma de nitrato y en forma de amonio (NO_3^-N y NH_4^+-N) para sumar N mineral (N_{min}). En el intervalo 30-90 cm, sólo se tuvo en cuenta el NO_3^-N , ya que la cantidad de NH_4^+-N presente se consideraba insignificante. Para el cálculo del aporte de abonado nitrogenado, se utilizó el sistema N_{min} (Scharpf 1991). El sistema N_{min} se basa en el uso de "valores objetivo" que han sido obtenidos de múltiples ensayos de fertilización, y tiene en cuenta el N presente en el cultivo en el momento de cosecha ($N_{extracc-planta}$), el N en suelo en el momento de cosecha ($N_{min-residual}$), y la mineralización de N aparente neta (MAN), para obtener un rendimiento máximo (Feller y Fink 2002). En nuestro estudio, se evaluó el efecto de seis dosis de nitrógeno: 0%, 25%, 50%, 100%, 125% y 150%.

Otros datos necesarios para el cálculo de las emisiones de N_2O fueron obtenidos de la base de datos Ecoinvent 2.2. (Ecoinvent 2010), incluyendo la fabricación de los materiales necesarios para la construcción del invernadero y material plástico (acolchado y agrotexil) utilizado en los sistemas de cultivo AC y AC+AG y los materiales empleados en la instalación del equipo auxiliar. La fabricación de fertilizantes y sus emisiones, consumo de energía y transporte de materiales y residuos fueron calculados usando la base de datos de Williams et al. (2006).

Para la evaluación ambiental se incluyeron los procesos y flujos considerados para los sistemas de producción evaluados: Estructura, Equipo Auxiliar, Fertilizantes y Residuos.

- En la Estructura se ha tenido en cuenta la fabricación y transporte del material necesario para crear la estructura y construcción del invernadero y material plástico (acolchado y agrotexil) empleado en los sistema de cultivo AC y AC+AG. La estructura del invernadero es metálica, de acero galvanizado y multimodular con cubierta de plástico. Los elementos de acero que componen la estructura del invernadero fueron postes, alambres, perfiles, ejes, arcos, canalones y ventiladores. El hormigón empleado en los cimientos del invernadero, el material plástico

de polietileno utilizado en la cubierta, suelo, paredes y ventanas del invernadero y usado para el acolchado en los sistemas AC y AC+AG, así como el material de polipropileno del agrotexil, fueron tenidos en cuenta en el proceso Estructura. Las emisiones producidas en la fabricación de los materiales empleados, su extracción y transporte (tipo de vehículo y km recorridos) hasta el lugar de producción, también fueron incluidos en la evaluación ambiental.

- En el Equipo Auxiliar se han incluido todos los materiales empleados en la fabricación de los elementos necesarios en el sistema de riego así como el transporte de los mismos y la energía gastada por el sistema de riego durante su funcionamiento. Los materiales empleados en este proceso fueron: acero en las bombas de riego e inyectores, polietileno en tuberías y cloruro de polietileno en las válvulas. El transporte (tipo de vehículo y km recorridos) de estos materiales a cada sistema de producción y la electricidad consumida por las bombas de impulsión, también se tuvieron en cuenta en el Equipo Auxiliar.
- En los Fertilizantes se ha incluido las cantidades totales de nitrógeno (N), fósforo (P_2O_5) y potasio (K_2O) añadidas en todos los sistemas, así como el consumo de agua de riego y las emisiones de amoníaco (NH_3) y monóxido de dinitrógeno (N_2O) al aire y lixiviación de nitratos (NO_3) al agua (Tabla 1). En el proceso Fertilizantes también se han incluido las emisiones producidas durante la fabricación y producción de los fertilizantes aplicados. Las emisiones de N fueron calculadas siguiendo la metodología de Audsley (2000) y Brentrup et al. (2000):
Emisiones de NH_3 = 3% del N total aplicado (Brentrup et al. 2000)
Emisiones de N_2O = 1.25% del N total aplicado (Brentrup et al. 2000)
Lixiviación de NO_3 = N total aplicado – absorción de N por el cultivo – emisiones al aire de N (Audsley 2000)
- Dentro del proceso Residuos se ha considerado la gestión de todos los residuos generados (plásticos, materiales de acero y hormigón) incluyendo su transporte hasta el lugar donde son gestionados.

Tabla 1. Dosis de fertilizantes y emisiones al aire y al agua (por ha^{-1}) para el cultivo de lechuga y escarola, al aire libre (AL), acolchado plástico (AC), acolchado plástico combinado con agrotexil (AC+AG) e invernadero de plástico (INV).

Table 1. Fertilizer doses, emissions and irrigation water (ha^{-1}) for lettuce and escarole crops in the open field (AL), plastic mulch (AC), plastic mulch combined with fleece system (AC+AG) and greenhouse (INV) systems.

	LECHUGA		ESCAROLA	
	AL, AC, AC+AG	INV	AL, AC, AC+AG	INV
Dosis fertilizantes (Kg)				
N óptimo	84	135	109	190
P_2O_5	92	92	92	92
K_2O	220	220	220	220
Emisiones al aire (Kg)				
NH_3 -N	2	3	2	4
NO_2 -N	1	1	1	2
Emisiones al agua (Kg)				
NO_3 -N	8	14	11	19
P	4	4	4	4

Resultados

La Figura 1 muestra la producción comercial de lechuga y escarola, respectivamente, en función del N disponible para los diferentes niveles de aplicación de N en todos los sistemas de cultivo. El N disponible en la planta se calcula como la suma de N aportado, N_{min} inicial y MAN. Para la lechuga, al aumentar la dosis de N en todos los sistemas, aumenta también la producción (Fig. 1a). Sin embargo, en el cultivo de escarola la producción apenas aumenta a partir de 100% N (Fig. 1b). En general, la producción comercial fue más alta para los sistemas de cultivo protegidos, siendo mayor en el invernadero y con producciones más bajas al aire libre.

Los valores absolutos de las emisiones de N_2O por tonelada de producto para cada sistema de producción de lechuga y escarola y para las diferentes dosis de N evaluadas se muestran en la Tabla 2. Los resultados obtenidos indican emisiones de N_2O similares para ambos cultivos, pero en la escarola esta carga ambiental es más alta debido a que su producción es más baja. Las mayores cargas medioambientales se observaron para la dosis de 150% N para todos los sistemas en ambos cultivos. Las emisiones de N_2O fueron un 31% y 33% superior en el cultivo de lechuga y escarola, respectivamente, para la dosis de 150% N respecto a 100% N en los sistemas de cultivo AL, AC y AC+AG. En los cultivos bajo invernadero se encontraron impactos 26% y 28% superiores a la dosis 100% N en lechuga y escarola, respectivamente. Cuando la dosis de N se redujo un 50% y un 75% respecto a la dosis 100% N, el impacto ambiental producido por las emisiones de N_2O disminuye. Cuando la dosis de N se redujo un 75%, las emisiones disminuyeron hasta un 72% y 53% en lechuga y escarola, respectivamente, en los sistemas AL, AC y AC+AG y hasta un 74% y 60% en lechuga y escarola bajo invernadero, respectivamente. El sistema AC+AG presentó las emisiones más bajas respecto al resto de sistemas en ambos cultivos.

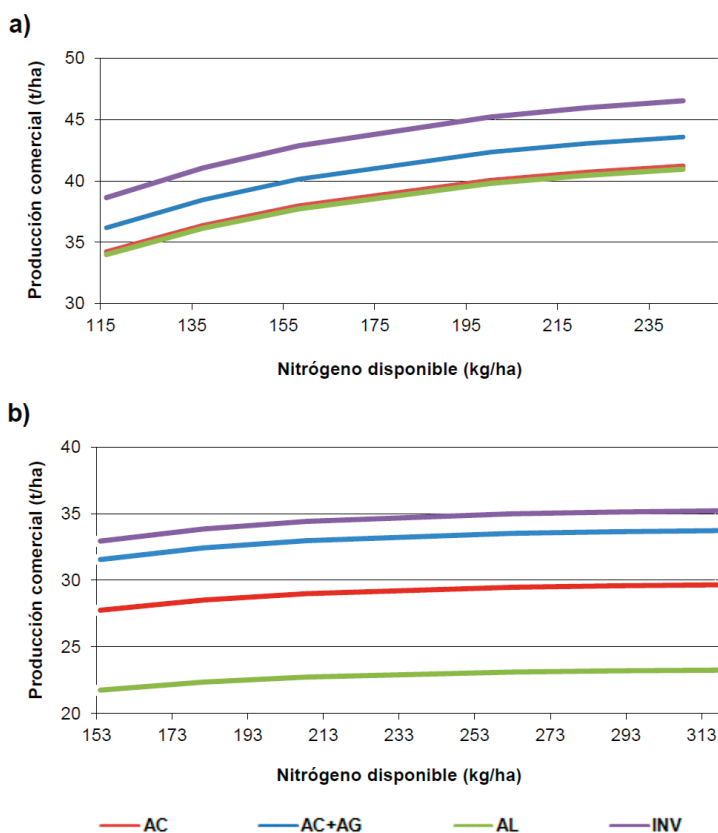


Figura 1. Producción comercial media ($t ha^{-1}$) de a) lechuga y b) escarola en función del N disponible ($kg ha^{-1}$) en los sistemas al aire libre (AL), acolchado plástico (AC), acolchado plástico combinado con agrotexil (AC+AG) e invernadero de plástico (INV).

Figure 1. Average yield ($t ha^{-1}$) response to available N ($kg ha^{-1}$) for the a) lettuce and b) escarole crops in open field (AL), plastic mulch (AC), plastic mulch combined with fleece (AC+AG) and greenhouse (INV) systems.

La diferencia entre AL y AC fue menor en lechuga (Tabla 2a) que en escarola (Tabla 2b) debido a una producción muy similar en lechuga en estos sistemas de cultivo. Para todos los niveles de N y ambos cultivos, el invernadero fue el sistema de producción con mayores emisiones de N₂O, con diferencias de hasta 46 g N₂O en lechuga y 86 g N₂O en escarola respecto al sistema AC+AG. Con todo, se ha demostrado que para el cultivo de lechuga, el sistema AC+AG sería la mejor opción desde el punto de vista ambiental y comercial con una dosis de N del 50%. En los sistemas AL y AC se redujo la producción sólo un 5% para una dosis de N del 50%. Para el cultivo de escarola, en el sistema AC+AG con una dosis de N del 100%, se obtiene un rendimiento comercial óptimo y para una dosis de N del 50%, se reduciría el rendimiento sólo un 3% pero las emisiones de N₂O (g t⁻¹) disminuirían drásticamente al 49%.

Si comparamos los valores absolutos de las emisiones de N₂O por superficie (Tabla 3), también observamos mayores emisiones en el sistema INV para todas las dosis de N y ambos cultivos, con diferencias de hasta el 50% para las dosis de N de 100%, 125% y 150%, respecto al resto de sistemas. Las emisiones fueron iguales para los sistemas AL, AC y AC+AG y se obtuvieron mayores cargas para la dosis 150% N en todos los sistemas y ambos cultivos, siendo la escarola el cultivo con mayores emisiones de N₂O.

Las contribuciones de la Estructura, Equipo Auxiliar, Fertilizantes y Residuos para el cultivo de lechuga y escarola y dosis de N de

0%, 25%, 100% y 150%, son representadas en las Figuras 2 y 3, respectivamente.

Durante la etapa de producción de los cultivos evaluados, la de los Fertilizantes fue la fase del proceso de producción con mayores contribuciones en todos los sistemas de cultivo y para la mayoría de las dosis de N probadas. En los sistemas AL, AC y AC+AG, el Equipo Auxiliar alcanza mayores contribuciones para dosis de 0% N, seguido de los Fertilizantes, en ambos cultivos. Las contribuciones producidas por el Equipo Auxiliar son del 70% para AL y 65% para AC y AC+AG en el cultivo de lechuga y de 78%, 71% y 67% en AL, AC y AC+AG, respectivamente, para la escarola. En cuanto a los Fertilizantes, la contribución con 0% N fue de 29% en AL y 33% en AC y AC+AG en el cultivo de lechuga y de 21%, 28% y 31% en AL, AC y AC+AG, respectivamente, para la escarola. Para el resto de dosis de N (50%, 100% y 150%) la mayor contribución fue obtenida por parte de los Fertilizantes alcanzando un 100% de carga ambiental en ambos cultivos para AL, AC y AC+AG. Por otro lado, INV fue el sistema de cultivo con mayores emisiones de N₂O producidas por parte de la Estructura y los Fertilizantes. Para 0% N la contribución más alta fue producida por la Estructura (99% en ambos cultivos) y para el resto de dosis, los Fertilizantes alcanzaron las contribuciones más altas en las emisiones de N₂O. Las contribuciones por parte de los Residuos fueron prácticamente nulas para todas las dosis de N y sistemas de cultivo.

Tabla 2. Valores de las emisiones de N₂O (g t⁻¹), para las dosis de nitrógeno 0%, 25%, 50%, 100%, 125%, 150% en el cultivo de a) lechuga y de b) escarola al aire libre (AL), acolchado plástico (AC), acolchado plástico combinado con agrotexil (AC+AG) e invernadero de plástico (INV).

Table 2. N₂O emissions (g t⁻¹) in a) lettuce and b) escarole crops for different N fertilizers rates of 0%, 25%, 50%, 100%, 125%, 150% in the open field (AL), plastic mulch (AC), plastic mulch combined with fleece system (AC+AG) and greenhouse (INV) systems.

LECHUGA							
% de N óptimo	KgN ha ⁻¹		emisiones N ₂ O (g t ⁻¹)				
	AL, AC, AC+AG	INV	AL	AC	AC+AG	INV	
0%	0	0	0.2	0.1	0.1	21.2	
25%	21	35	11.4	11.3	10.7	35.9	
50%	42	68	21.7	21.6	20.4	49.6	
100%	84	135	41.0	40.8	38.6	75.9	
125%	105	169	50.4	50.1	47.4	88.9	
150%	126	203	59.8	59.4	56.2	102.0	

ESCAROLA							
% de N óptimo	Kg N ha ⁻¹		emisiones N ₂ O (g t ⁻¹)				
	AL, AC, AC+AG	INV	AL	AC	AC+AG	INV	
0%	0	0	0.3	0.2	0.2	25.1	
25%	27	48	23.9	18.7	16.4	51.6	
50%	55	95	46.7	36.6	32.2	77.5	
100%	109	190	91.6	71.8	63.1	129.0	
125%	136	238	114.0	89.3	78.6	155.0	
150%	164	285	136.0	107.0	94.0	180.0	

Tabla 3. Valores de las emisiones de N₂O (Kg ha⁻¹) para las dosis de nitrógeno 0%, 25%, 50%, 100%, 125%, 150% en el cultivo de a) lechuga y de b) escarola al aire libre (AL), acolchado plástico (AC), acolchado plástico combinado con agrotexil (AC+AG) e invernadero de plástico (INV).

Table 3. N₂O emissions (Kg ha⁻¹) in the a) lettuce and b) escarole crops for different N fertilizers rates of 0%, 25%, 50%, 100%, 125%, 150% in the open field (AL), plastic mulch (AC), plastic mulch combined with fleece system (AC+AG) and greenhouse (INV) systems.

LECHUGA							
% de N óptimo	Kg N ha ⁻¹		emisiones N ₂ O (Kg ha ⁻¹)				
	AL, AC, AC+AG	INV	AL	AC	AC+AG	INV	
0%	0	0	0.0	0.0	0.0	0.8	
25%	21	35	0.4	0.4	0.4	1.5	
50%	42	68	0.8	0.8	0.8	2.1	
100%	84	135	1.6	1.6	1.6	3.4	
125%	105	169	2.0	2.0	2.0	4.1	
150%	126	203	2.4	2.4	2.4	4.7	

ESCAROLA							
% de N óptimo	Kg N ha ⁻¹		emisiones N ₂ O (Kg ha ⁻¹)				
	AL, AC, AC+AG	INV	AL	AC	AC+AG	INV	
0%	0	0	0.0	0.0	0.0	0.8	
25%	27	48	0.5	0.5	0.5	1.7	
50%	55	95	1.1	1.1	1.1	2.7	
100%	109	190	2.1	2.1	2.1	4.5	
125%	136	238	2.6	2.6	2.6	5.4	
150%	164	285	3.2	3.2	3.2	6.3	

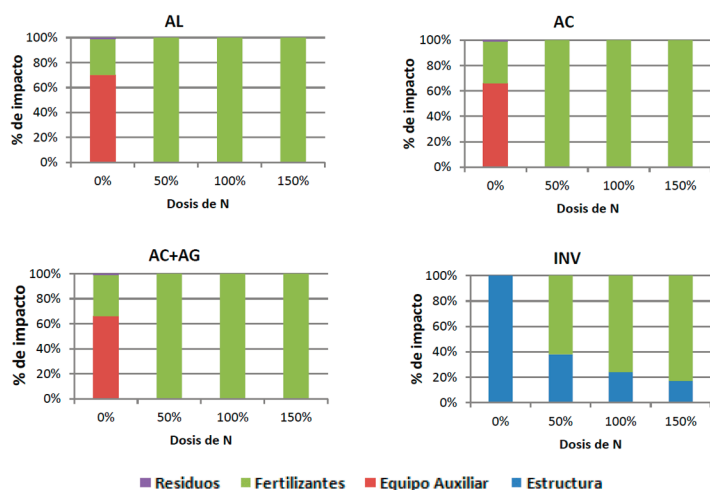


Figura 2. Contribuciones de cada proceso para las emisiones de N_2O y para las dosis de nitrógeno 0%, 50%, 100% y 150% N, en el cultivo de lechuga al aire libre (AL), acolchado plástico (AC), acolchado plástico combinado con agrotexil (AC+AG) e invernadero de plástico (INV).

Figure 2. Section contributions to N_2O emissions for lettuce production in open field (AL), plastic mulch (AC), plastic mulch combined with fleece (AC+AG) and greenhouse (INV) systems for 0%, 50%, 100% and 150% of N fertilizer.

Discusión

El estudio de impacto ambiental realizado mediante la metodología de ACV ha permitido evaluar las emisiones de N_2O generadas por diferentes sistemas de producción de dos cultivos hortícolas de hoja. Además, en este estudio se identificaron los procesos que más contribuyen a las emisiones de N_2O , y así poder proponer estrategias de mitigación. Desde un punto de vista agronómico no interesa aumentar la fertilización nitrogenada a partir de la dosis 100% N en el cultivo de escarola ya que la producción es similar (Fig. 1b). La producción de escarola es más baja que en lechuga, por tanto, teniendo en cuenta que la UF que se ha considerado es la producción comercial del cultivo, la escarola causa emisiones de N_2O más altas en todos los sistemas de cultivo y dosis de N que la lechuga. Por otro lado, la alta producción obtenida en el sistema INV, no justificó el alto impacto ambiental causado para todas las dosis de N respecto al resto de sistemas (Tabla 2). En cultivos de tomate, pepino y apio bajo invernadero, Min et al (2011) demostraron que la reducción de un 40% en la dosis de N aplicado respecto a la cantidad de N aplicada en las prácticas agrícolas locales, podría disminuir hasta un 33% las emisiones de N_2O anuales acumuladas, sin afectar a la producción final de los cultivos. Según Cayuela et al. (2016) en cultivos hortícolas en suelo franco con riego por goteo y utilizando nitrato amónico como fertilizante, las emisiones de N_2O son de $1,2 \text{ kg ha}^{-1}$. En nuestro caso, se han obtenido valores inferiores por debajo de la dosis 100% N en los sistemas de cultivo AL, AC y AC+AG y para 0% de N en el sistema INV, para ambos cultivos hortícolas en las mismas condiciones agronómicas (Tabla 3).

Las cargas y emisiones consideradas en el proceso Fertilizantes fueron las responsables de las mayores emisiones de N_2O en todos los sistemas de cultivo tanto en lechuga como en escarola (Figs. 2 y 3). Esto se debió a una la aplicación de fertilizantes, principalmente fertilizantes nitrogenados y sus emisiones al aire y al agua, así como a las emisiones producidas durante la fabricación de los fertilizantes empleados. Se deberá, por tanto, optimizar un manejo y uso más eficiente de los fertilizantes (Cowell 1998), evitando la aportación en exceso de agua y fertilizantes; con ello, además, se aumenta el aprovechamiento de un recurso escaso como es el agua. Russo et al. (2008) obtuvieron valores más bajos para todos los índices medioambientales evaluados en la producción sin suelo de un cultivo ornamental a diferencia de un cultivo en suelo, e indicaron la importancia de la productividad en sistemas

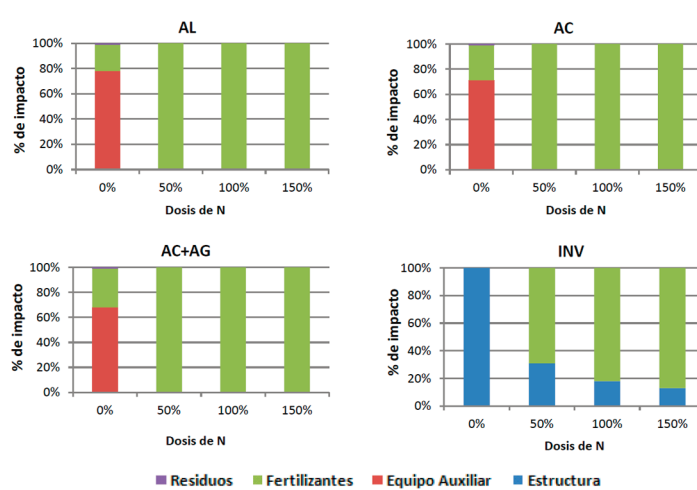


Figura 3. Contribuciones de cada proceso para las emisiones de N_2O y para las dosis de nitrógeno 0%, 50%, 100% y 150% N, en el cultivo de escarola al aire libre (AL), acolchado plástico (AC), acolchado plástico combinado con agrotexil (AC+AG) e invernadero de plástico (INV).

Figure 3. Section contributions to N_2O emissions for escarole production in open field (AL), plastic mulch (AC), plastic mulch combined with fleece (AC+AG) and greenhouse (INV) systems for 0%, 50%, 100% and 150% of N fertilizer.

de riego cerrados. El uso de sistemas de recirculación del agua de drenaje es una alternativa que permitiría reducir el impacto, ya que, cuando el agua de drenaje es reutilizada se descargan menos sustancias minerales, lo que se traduciría en un menor uso de agua y fertilizantes (Nienhuis et al. 1996). Aguilera et al. (2013) concluyeron que el uso de fertilizantes orgánicos y técnicas para minimizar el consumo de agua podrían reducir las emisiones de N_2O procedentes de sistemas de cultivo bajo condiciones climáticas mediterráneas.

Para una dosis de 0% N, se observó la contribución más alta de emisiones de N_2O en ambos cultivos para los sistemas AL, AC, AC+AG en el proceso Equipo Auxiliar (Fig. 2 y Fig. 3). Esto se debió, principalmente, a la fabricación y procesado de los elementos necesarios en el sistema de riego, como son, el acero empleado en bombas e inyectores, polietileno en tuberías y cloruro de polivinilo en electroválvulas. Por tanto, la reducción de emisiones de N_2O por parte del Equipo Auxiliar también debe considerarse prioritaria en la mejora ambiental del cultivo hortícola de hoja, mediante la utilización de materiales reciclados o de mayor duración. Las contribuciones que produce la Estructura en el sistema de cultivo INV, se deben a la elevada cantidad de acero y materiales plásticos necesarios para su construcción. Las emisiones de N_2O son producidas como consecuencia de la fabricación y procesos de extrusión de los elementos y materiales que conforman la estructura del invernadero. Por ello, la reducción del impacto de la Estructura se debe considerar una prioridad en estos sistemas, utilizando materiales reciclados y/o con vida útil más larga (Antón et al. 2005). Estudios previos realizados en cultivos del área mediterránea obtuvieron resultados similares en judía verde (Romero-Gómez et al. 2009; Romero-Gómez et al. 2012) y tomate (Antón et al. 2005; Torrellas et al. 2012).

Conclusiones

El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología útil para identificar, cuantificar y evaluar las emisiones de N_2O que producen diferentes sistemas de producción de los cultivos de lechuga y escarola con diferentes dosis de N. En este estudio demostramos que cuando la dosis de N se reduce un 50% y un 75% respecto a la dosis 100% N, el impacto ambiental producido por las emisiones de N_2O disminuye. Por otra parte, las emisiones de N_2O fueron más altas en el sistema de cultivo bajo invernadero. Las mayores emisiones de N_2O en todos los sistemas de cultivo tanto en lechuga

como en escarola proceden del uso de fertilizantes. Cuando se reduce la dosis de N respecto de la dosis 100% N, disminuye el impacto ambiental producido por las emisiones de N₂O. Por tanto, para los cultivos de lechuga y escarola, el sistema AC+AG sería la mejor opción teniendo en cuenta la combinación de criterios ambientales (emisión de N₂O) y comerciales (producción), con una dosis de N del 50%.

Referencias

- Acar, B., Paksoy, M., Turkmen, O., Seymen, M. 2008. Irrigation and nitrogen level affect lettuce yield in greenhouse condition. *African Journal of Biotechnology* 7(24): 4450-4453.
- Aguilera, E., Lasalleta, L., Sanz-Cobena, A., Garnier, J., Vallejo, A. 2013. The potential of organic fertilizers and water management to reduce N₂O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 164: 32-52.
- Antón, A., Montero, J.I., Muñoz, P. 2005. LCA and tomato production in Mediterranean greenhouses. *International Journal Agricultural Resources, Governance and Ecology* 4 (2): 102-112.
- Audsley, E. 2000. Systematic procedures for calculating agricultural performance data for comparing systems. En: Weidema, B., Meeusen, M. (eds.). *Agricultural data for life cycle assessments* (1, 35-46). Agricultural Economics Research Institute, La Haya, Países Bajos.
- Audsley, E., Alber, S., Clift, R., Cowell, S., Crettaz, P., Gaillard, G., Hausheer, J., Jolliet, O., Kleijn, R., Mortensen, B., Pearce, D., Roger, E., Teulon, H., Weidema, B., van Zeijts, H. 1997. *Harmonisation of environmental life cycle assessment for agriculture. Final report concerted action AIR3-CT94-2028*. European Commission DG VI Agriculture, Reino Unido.
- Brentrup, F., Küsters, J., Lammel, J., Kuhlmann, H. 2000. Methods to estimate on-field nitrogen emissions from crop production as an input to LCA studies in the agricultural sector. *International Journal of Life Cycle Assessment* 5(6): 349-357.
- Bouwman, A.F. 1995. *Compilation of a global inventory of emissions of nitrous oxide*. Ph.D. thesis, University of Wageningen. Wageningen, Países Bajos.
- Bussink, D.W. 1996. *Ammonia volatilisation from intensively managed dairy pastures*. Ph.D. thesis, University of Wageningen. Wageningen, Países Bajos.
- Cayuela, M.L., Aguilera, E., Sanz-Cobena, A., Adams, D.C., Abalos, D., Barton, L., Ryals, Silver, W.L., Alfaro, M.A., Pappa, V.A., Smith, P., Garnier, J., Billen, G., Bouwman, L., Bondeau, A., Lassaletta, L. 2016. Direct nitrous oxide emissions in Mediterranean climate cropping system: Emission factors based on a meta-analysis of available measurement data. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 238 (2017) 25-35
- Commission of the European Communities 1999. *Directions towards sustainable agriculture*. COM (1999) 22 final. Commission of the European Communities, Bruselas, Países Bajos.
- Cowell, S.J. 1998. *Environmental life cycle assessment of agricultural systems: Integration into Decision-Making*. PhD tesis, University of Surrey, Guildford, Reino Unido.
- ECETOC 1994. *Ammonia Emissions to Air in Western Europe*. Technical Report N° 62. European Chemical Industry Ecology and Toxicology Centre (ECETOC). Bruselas, Países Bajos.
- Ecoinvent 2010. Ecoinvent Data v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. [<http://www.ecoinvent.org/>]
- FAOSTAT 2015. The FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Statistical Database. [<http://faostat.fao.org>]
- Feller, C., Fink, M. 2002. N_{min} target values for field vegetables. *Acta Horticulturae* 571: 195-201.
- Firestone, M.K., Davidson, E.A. 1989. Microbiological basis of NO and N₂O production and consumption in soils. En: Andreae, M.O., Schimel, D.S. (Eds.), *Exchanges of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*. John Wiley and Sons, Nueva York, Estados Unidos.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W. et al., 2007. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. En: Press, C.U. (Ed.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos.
- Freney, J.R. 1997. Emission of nitrous oxide from soils used for agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystem* 49: 1-6.
- ISO-14040 2006. *Environmental management-life cycle assessment-principles and framework*. International Organization for Standardization ISO, Ginebra, Suiza.
- Kaiser, E.A., Eiland, F., Germon, J.C., Gispert, M.A., Heinemeyer, O., Henault, C., Lind, A.M., Maag, M., Saguer, E., Van Cleemput, O., Vermoesen, A., Webster, C. 1996. What predicts nitrous oxide emissions and denitrification N-loss from European soils. *Pflanzenernähr Boden* 159: 541-547.
- Kroeze, C. 1994. *Nitrous Oxide (N₂O)-emission inventory and options for control in the Netherlands*. RJVM Report N° 773001004. National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM), Bilthoven, Países Bajos.
- Maroto, J.V., Miguel, A., Baixauli, C. 2000. *La lechuga y la escarola*. Fundación Caja Rural Valencia. Mundi-Prensa, Madrid, España. Pp. 242.
- MARM 2015. *Anuario de Estadística Agroalimentario del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino*. MARM. Madrid, España.
- Martínez-Blanco, J., Muñoz, P., Antón, A. and Rieradevall, J. 2011. Assessment of tomato Mediterranean production in open-field and standard multi-tunnel greenhouse, with compost or mineral fertilizers, from an agricultural and environmental standpoint. *Journal of Cleaner Production* 19: 985-997.
- Min, J., Shi, W., Xing, G., Powelson, D., Zhu, Z. 2011. Nitrous oxide emissions from vegetables grown in a polytunnel treated with high rates of applied nitrogen fertilizers in Southern China. *Soil Use and Management* 28: 70-77.
- Mourad, A.L., Coltro, L., Oliveira, P.A.P.L.V., Kletecke, R.M., Baddini, J.P.A.O. 2007. A simple methodology for elaborating the life cycle inventory of agricultural products. *International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (6): 408-413.
- Nienhuis, J.K., De Vreede, P.J.A, Brumfield, R.G. 1996. Utility of the environmental life cycle assessment method in horticulture. En: *Proceedings of the XIIIth International Symposium on Horticultural Economics* 429: 531-538.
- Núñez, M., Martínez, J., Muñoz, P., Antón, A., Rieradevall, J. 2008. Estudios preliminares de evaluación de impacto ambiental global en la aplicación de compost como fertilizante en cultivos de tomate al aire libre y en invernadero. En: Oscar Huerta, O., López, M., Martínez, F.X. (eds.). *Ponencias y comunicaciones de las I Jornadas de la Red Española de Compostaje, 6-9 de febrero de 2008, Barcelona, pp. 184*. Red Española de Compostaje, Escola Superior d'Agricultura de Barcelona y Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Pang, X., Mu, Y., Lee, X., Fang, S., Yuan, J., Huang, D. 2009. Nitric oxides and nitrous oxide fluxes from typical vegetables cropland in China: Effects of canopy, soil properties and field management. *Atmospheric Environment* 43: 2571-2578.
- Rickie, L.H., Muchha, R.R., Carl, R.C., Niedziela, Jr. 2008. Evaluating inorganic nitrogen and Ryegrass-Crimsonclover mixture fertilization of spring broccoli and lettuce by ¹⁵Nitrogen tracing and mass balance. *Journal of Plant Nutrition* 31(6): 1033-1045.
- Romero-Gómez, M., Antón, A., Soriano, T., Suárez-Rey, E.M., Castilla, N. 2009. Environmental impact of greenbean cultivation: comparison of screen greenhouses vs. open field. *Journal of Food, Agriculture and Environment* 7: 754-760.
- Romero-Gómez, M., Suárez-Rey, E.M., Antón, A., Castilla, N. and Soriano, T. 2012. Environmental impact of screenhouse and open-field cultivation using a life cycle analysis: the case study of green bean production. *Journal of Cleaner Production* 28: 63-69.
- Russo, G., Magnozza, G.S., De Lucia, B. 2008. Environmental improvements of greenhouse flower cultivation by means of LCA methodology. *Acta Horticulturae* 801: 301-305.
- Sádaba, S., Uribarri, A., Aguado, G., Del Castillo, J., Astiz, M. 2010. Lechuga Batavia. Recomendación y actualización de variedades. *Navarra Agraria*, Mayo-Junio 2010, 35-37.
- Scharpf, H.C. 1991. *Stickstoffdüngung im Gemusebau*. AID Nr. 1223. Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn, Alemania.
- Sonneveld, C. 1990. Estimating quantities of water-soluble nutrients in soils using a specific 1:2 by volume extract. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 21, 1257- 1265.
- Suárez-Rey, E.M., Giménez, C., Soriano, T., Moyano, J.E., Castilla, N. 2008. Characterization of growth and quality parameters in escarole (*Cichorium*

- rium endivia* L.) with different covering techniques. *European Journal of Horticultural Science* 73(6): 259-266.
- Suárez-Rey, E.M., Romero-Gómez, M., Montosa, J.M., Mansilla, F. 2009. Producción de ajo tierno bajo cubiertas flotantes de agrotexil. *Revista Horticultura* 212, 1-9.
- Suárez-Rey E.M., Romero-Gómez, M. 2014. *Respuesta del cultivo de escarola al abonado nitrogenado en una zona vulnerable a la contaminación por nitratos*. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Granada, España. 19 p.
- Sutton, M.A., Bleeker, A., Howard, C.M., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W., van Grinsven, H.J.M., Abrol, Y.P., Adhya, T.K., Billen, G., Davidson, E.A., Datta, A., Diaz, R., Erismann, J.W., Liu X, J., Oenema, O., Palm, C., Raghuram, N., Reis, S., Scholz, R.W., Sims, T., Westhoek, H., F.S., Z. 2013. Our nutrient world. The challenge to produce more food and energy with less pollution. UNEP, Edimburgo, Reino Unido.
- Torrellas, M., Antón, A., Ruijs, M., García Victoria, N., Stanghellini, C., Montero, J.I. 2012. Environmental and economic assessment of protected crops in four European scenarios. *Journal of Cleaner Production* 28: 45-55.
- UN-DSD (United Nations Division for Sustainable Development). 2000. Agenda 21. Chapter 14: Promoting sustainable agriculture and rural development. United Nations (UN), Nueva York, Estados Unidos.
- Vázquez, N., Pardo, A., Suso, L., Quemada, M. 2006. Drainage and nitrate leaching under processing tomato growth with drip irrigation and plastic mulching. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112: 313-323.
- Williams, A.G., Audsley, E., Sandars, D.L. 2006. Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities. Main report. Defra Research Project IS0205. Cranfield University and Defra. Bedford, Reino Unido.
- Xiong, Z., Xie, Y., Xing, G., Zhu, Z., Butenhoff, C. 2006. Measurements of nitrous oxide emissions from vegetable production in China. *Atmospheric Environment* 40: 2225-2234.